

*В.К. Костенко, д-р техн. наук, професор, В.В. Колеснікова
(Донецький національний технічний університет),
А.І. Морозов, канд. техн. наук
(Національний університет цивільного захисту України)*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОТИТЕПЛОВОГО ОДЯГУ

У статті наданий теоретичний розрахунок теплового потоку від зовнішніх джерел тепла через всю товщину стінки протитеплого жилета на охолоджуючі елементи, запропонована вдосконалена конструкція протитеплого одягу гірників і рятувальників, що дав змогу підвищити її охолоджуючий ресурс, описані результати експериментів з дослідження теплоізоляційних властивостей базової конструкції протитеплого жилета і модернізованої, методом тепловізійної діагностики, а також надані рекомендації по подальшого вдосконалення індивідуальних засобів протитеплого захисту.

Ключові слова: засоби індивідуального протитеплого захисту, тепловий потік, променевідбивний шар, теплоізоляційні властивості, тепловізійна техніка

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами. Із збільшенням глибини розробки умови праці в гірничих виробках погіршуються в основному через підвищення температури повітря. Як свідчить досвід роботи у шахтах Донецької і Луганської областей, температура повітря на глибинах понад 1000 м в тупикових виробках становить 40 - 50 °С.

Перебування гірників і рятувальників протягом робочої зміни в умовах нагріваючого мікроклімату може призвести до перегріву організму і теплових ударів. Це викликає необхідність реалізації ефективних заходів боротьби з високими температурами повітря у виробках. Згідно з Правилами безпеки у вугільних шахтах, під час розробки родовищ корисних копалин підземним способом при температурі повітря в гірничих виробках понад 26 °С повинні вживатися спеціальні заходи для її зниження [1]. Основні способи і напрями покращення температурних умов у виробках виїмкових ділянок на глибоких горизонтах діючих шахт дають позитивні результати, проте на сьогодні важливим і необхідним для подальшого розвитку є напрям, пов'язаний з виконанням комплексу досліджень з розробки і впровадження індивідуальних засобів протитеплого захисту.

Аналіз досліджень і публікацій

На підставі численних результатів досліджень, проведених працівниками науково-дослідного інституту гірничорятувальної справи «Респіратор» (НДІГС) [2], і досвіду застосування встановлено, що з точки зору простоти конструктивного виконання, надійності і охолоджуючої здатності найбільш доцільне використання протитеплого одягу з водокрижаною системою охолодження із застосуванням водокрижаних охолоджуючих елементів (ОЕ-2), що розміщуються локально в поліетиленових ґратчастих кишнях на внутрішній поверхні захисного одягу. Велика увага приділялася розробці і обґрунтуванню параметрів охолоджуючих елементів, що підтверджується безліччю статей, присвячених цьому питанню [3,4,5] і мало вдосконалювалася конструкція самого одягу.

Постановка задачі. Основною задачею цієї роботи є перевірка ефективності протитеплого жилета, доопрацьованого на підставі запропонованих авторами удосконалень з додатковими рекомендаціями до його подальшого вдосконалення.

Виклад матеріалів і результати. В даний час для роботи в умовах нагріваючого мікроклімату використовуються теплозахисні куртки ТК-40, ТК-50, а також охолоджуючі жилети ОЖГ, розроблені НДІГС «Респіратор». Для зняття накопичуваного тепла в зоні піддодежного простору в них розміщують додаткову систему термозахисту, засновану на водокрижаному джерелі охолодження, а конструктивні параметри костюма розраховують з врахуванням функціонування одночасно двох систем – теплозйомної і теплоізоляційної.

Основна задача вдосконалення засобів індивідуального захисту організму – добитися максимальної ефективності дії охолоджуючих елементів шляхом зменшення теплообміну між шарами захисного одягу і системою охолоджуючих елементів.

Існують два основні види теплообміну: кондуктивний та променистий. Кондуктивний вид теплообміну здійснюється при контакті тіл з різною температурою поверхні, променистий – завдяки випромінювальній енергії тіл. Ефективність кондуктивного теплообміну на порядок вища за променевий.

При проектуванні, розробці і експлуатації традиційних засобів індивідуального протитеплого захисту, зазвичай застосовуються декілька способів зменшення теплової дії. Традиційно тепловий потік зменшують за допомогою зниження кондуктивного теплообміну. З цією метою застосовуються матеріали, з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Наступним кроком удосконалень є нанесення на зовнішню поверхню одягу різних дзеркальних, металізованих покриттів, що відображають інфрачервоне випромінювання. Проте в умовах нагріваючого мікроклімату гірничих виробок, де немає відкритого полум'я і де температура повітря становить 30-45⁰С верх одягу з металізованої тканини не є ефективним методом зменшення теплового потоку з навколишнього середовища. Подальше доопрацювання – введення в конструкцію захисного одягу акумуляторів холоду на основі різних видів холодоагентів. Всі ці удосконалень і розробки дозволяють охолоджуючим комплектам бути ефективними захисними засобами під час роботи в зонах з підвищеною температурою.

Проте, існує досить причин продовжити доопрацювання теплозахисного одягу. Всі вище перелічені протитеплові засоби індивідуального захисту (ПЗІЗ) не дають змоги ефективно використовувати ресурс охолоджуючих елементів в результаті кондуктивного характеру теплообміну між теплознімною і теплоізоляційною частинами одягу, а також часткового витрачання ресурсу на охолодження навколишнього середовища унаслідок безпосереднього контакту охолоджуючих елементів з внутрішньою поверхнею теплоізоляційної частини жилета. Крім того, лицьова частина вищезгаданих курток і жилета складається з двох піл з повітряним зазором між ними, що веде до проникнення гарячого повітря в підкостюмний простір і зниження ресурсу охолоджуючих елементів лицьової частини одягу порівняно з елементами спинної частини і, як наслідок, до нерівномірного розподілу низькотемпературного випромінювання від охолоджуючих елементів на тіло людини.

Авторами було запропоновано декілька удосконалень, що підвищують ефективність ПЗІЗ. Схема поперечного перетину вдосконаленого протитеплого жилета представлена на рис.1. Вдосконалень полягають: у введенні між теплоізоляційною і теплозійомною частинами одягу додаткового променевідбиваючого шару (7), виконаного з металізованої плівки з двома дзеркальними поверхнями; у обладнанні кишені внутрішньою (6) поліетиленовою ґратчастою стінкою; у виконанні жилета з цілісними лицьовою і спинною частинами, остання з яких має подовжені бічні поверхні зафіксовані на лицьовій частині застібками-липучками.

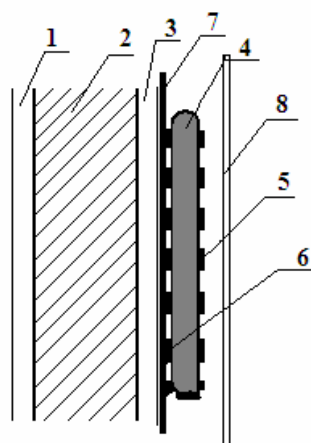


Рис.1. Поперечний перетин протитеплого жилета:

1 – зовнішній шар, 2 – середній теплоізоляційний шар, 3 – внутрішній підкладковий шар, 4 – холодоагент, 5 – зовнішня поліетиленова ґратчаста стінка кишені, 6 – внутрішня поліетиленова ґратчаста стінка кишені, 7 – променевідбиваючий шар, 8 – шар натільної білизни

Для діагностики проведених удосконалень використовували тепловізійну техніку, яка дає змогу в безперервному режимі безконтактним способом в реальному інтервалі часу отримувати інформацію про розподіл температурного поля на поверхні обстежуваного об'єкта. У наших цілях застосовувався тепловізор Тi-814, на основі неохолоджуваної болометричної матриці (320 240) елементів з основними параметрами: спектральний діапазон 7,5 – 14 мкм; температурна чутливість при 30°C становить 0,08°C; просторовий дозвіл 1,3 мрад; поле зору становить 23° - 17°; діапазон вимірюваних температур від –20°C до +1500°C (опційно).

Проведенню низки натурних експериментів передувало теоретичний розрахунок зменшення теплового потоку від зовнішніх джерел через всю товщину стінки протитеплового жилета. Передбачалося, що у нас напівнескінчена ізотропна площина, тобто граничні умови позначаються на зовнішніх поверхнях пластини по фронту теплового потоку. Це можливо при урахуванні малого порівняно з розмірами жилета елемента поверхні.

У загальному виді рівняння теплопровідності представимо як [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \nabla^2 T + \frac{1}{c\gamma} \cdot W, \quad (1)$$

де T – температура, c – питома теплопровідність тіла, γ – питома вага тіла, λ – коефіцієнт теплопровідності речовини (питома теплопровідність), що встановлюється експериментально (скалярна величина, залежна від природи речовини), W – потужність джерел тепла, в нашому випадку – зовнішні джерела.

Рівняння дає змогу враховувати кінцеву швидкість поширення тепла. У випадку з плоскою стінкою для стаціонарного поширення теплового потоку без внутрішніх джерел рівняння (1) приводиться до одновимірного рівняння Лапласа [7]. З нього, врахувавши граничні умови на зовнішній і внутрішній стороні шару, отримуємо вираз для теплового потоку.

$$q = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_i - T_k) \quad (2)$$

де q – тепловий потік, λ_i – питома теплопровідність i -го шару, δ_i – товщина – i -го шару, T_i – температура на зовнішній стороні, T_k – температура на внутрішній стороні. Зміна температури в кожному шарі становить:

$$T_1 - T_2 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad T_2 - T_3 = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad T_3 - T_4 = q \frac{\delta_3}{\lambda_3} \quad (3)$$

З виразу (3) отримуємо питомий тепловий потік:

$$q = (T_1 - T_4) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) \quad (4)$$

При розрахунках використовувалися такі величини:

$T_1 = 45^\circ\text{C}$, $T_4 = 38^\circ\text{C}$, $\delta_1 = 0,5\text{мм}$, $\delta_2 = 18\text{мм}$, $\delta_3 = 0,5\text{мм}$, λ_i – табличні величини. У базовому і модернізованому жилетах три шари однакові, тому однакові і всі теплові процеси, що протікають в них. В разі наявності холодоагенту, час ефективної роботи протитеплового жилета збільшується. Охолоджуючі елементи працюють в двох напрямках: з одного боку – поглинають тепловий потік, що пройшов через теплоізоляційний шар одягу, з іншого боку – теплову енергію, що виділяється внаслідок функціонування організму. У охолоджуючих елементах другої конфігурації (ОЕ-2), вживаних нами, в якості холодоагенту застосовувалася вода, яка знаходилася в ємкостях завтовшки 1см. Використання води здешевлює конструкцію жилета, і крім того, сильно спрощує розрахунки. Перед вживанням заморожуються. При експлуатації спочатку відбувається танення льоду, а потім нагрів води. Для спрощення розрахунків перерахунок проводився для об'єму один кубічний сантиметр. При таненні такого об'єму льоду, відповідно до формули:

$$Q = rm \quad (5)$$

поглинається 334 Дж тепла (тут Q – тепло, $r = 334$ кДж/кг – питома теплота танення льоду $m = 10^{-3}$ кг – маса вибраного об'єму льоду). Для нагріву цього ж об'єму води до температури 38°C , необхідне 160 Дж тепла. Це можна отримати з виразу:

$$Q = cm(T_1 - T_2) \quad (6)$$

де $c = 4,2$ кДж/кгК – питома теплоємність води, $T_1 - T_2 = 38^{\circ}\text{C}$ – різниця температур. Суміровав, тепловий потік від зовнішнього середовища (його температура 45°C), що пройшов через захисні шари (рис. 1 (1,2,3)), і тепловий потік від організму (температура $36,6^{\circ}\text{C}$), і порівнявши з теплопоглинаючою можливістю ОЕ-2, отримуємо, що час досягнення теплового балансу, в перерахунку на один кубічний сантиметр водної суміші становить – 16 хв. При експериментальній перевірці був отриманий результат – 14хв. Зменшення часу пов'язане з тим, що не вдалося отримати однорідну товщину холодоагенту.

Випробування протитеплових жилетів проходило у декілька етапів. Методика проведення для кожного етапу відбувалася за однаковою технологією. Протитепловий жилет споряджали замороженими охолоджуючими елементами і надягали на дослідника, який, знаходячись в приміщенні з підвищеною температурою (45°C) і підвищеною вологістю (90-95%). За допомогою тепловізора проводилося спостереження за температурним полем на поверхні і усередині охолоджуючого жилета, а також велося спостереження за станом дослідника. Експеримент вважався завершеним, коли температура охолоджуючих елементів сягала 20°C .

На першому етапі досліджували базову модель протитеплого жилета, на другому – модернізовану (забезпечену додатковим променевідбивним шаром). В якості додаткового шару застосовували алюмінієву фольгу, товщиною 10 мкм, коефіцієнт випромінювання якої становив величину $\varepsilon = 0,2$.

Результати експерименту показали, що поле поширення низькотемпературного випромінювання від ОЕ в експерименті з модернізованим жилетом в 1,5 раза більше, ніж в базовому зразку. Крім того, в модернізованому жилеті показник мінімальної температури нижчий, ніж в базовому, а це свідчить, що плівка з дзеркальною поверхнею, введена в протитепловий одяг не лише розширює поле розподілу низьких температур щодо охолоджуючого елемента, але і підвищує час теплзйому ОЕ-2, а значить збільшує і спільний охолоджуючий ресурс протитеплого одягу. Провівши експеримент в динаміці, отримали, що час нагрівання холодоагенту більший за наявності відбивної плівки на 20%. Крім того, результати досліджень показали, що середня температура на поверхні лицьової частини жилета виявилася на $2,1^{\circ}\text{C}$ вищою, ніж на спинній. Це дає підставу задуматися над моделлю жилета і змінити її так, щоб максимально збільшити область поширення знижених температур в підодяжному просторі.

Висновки

1. Використання в протитепловому жилеті шару з відзеркалювальною поверхнею збільшує охолоджуючий ресурс жилета в середньому на 17 %.
2. Різниця середніх температур фронтальної частки жилета між зоною, яка закрита полами жилета, і зоною між планками (зона застібки) становить 10 % (в середньому 3 - $3,5^{\circ}\text{C}$).
3. Середня температура тіла в області серця по закінченню експерименту була вищою в експерименті із стандартним жилетом і становила $36,8^{\circ}\text{C}$, що на $1,5^{\circ}\text{C}$ (3%) вище за температуру в експерименті з модернізованим жилетом.
4. Шар з дзеркальною поверхнею збільшує зону розповсюдження низьких температур відносно охолоджуючого елемента в середньому в 1,5 раза.

Список літератури:

1. Колесникова В.В. Повышение изоляционных свойств противотепловой одежды. / В.В. Колесникова, В.Ф. Клепиков, Е.М. Прохоренко. // Горно-спасательное дело. – 2010. – №47. – С.127 – 133.

2. Положий В.О. Индивидуальная противотепловая защита / В.О.Положий, И.Ф. Марийчук / Уголь Украины. – 2008. – № 12.

3. Карпекин В.В. Определение параметров водоледяного аккумулятора холода для противотепловой одежды горноспасателей / В.В.Карпекин, И.Ф.Марийчук, Ю.В.Клименко //Наук.вісник НГА. – 2002. – №5.

4. Пашковский П.С. Охлаждающие жилеты с соляными поглотителями теплоты / П.С.Пашковский, Т.А.Лазаренко //Уголь Украины. – 2011. – № 2.

5. Положий В.О. Метод расчета температуры водно-солевого раствора в охлаждающем пакете / Положий В.О. // Уголь Украины. – 2008. – № 4. – С. 31-33.

6. Grober H. Die grundgesetze der warmeubertragung. / H.Grober, S.Erk. – Berlin :Verlag von Julius springer, 1933. – 320p.

7. Фокин В.М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена. /В.М.Фокин, Г.П.Бойков, Ю.В.Видин. – Москва “Издательство машиностроение-1”,2005. – 192с.

В.К. Костенко, В.В. Колесникова, А.И. Морозов

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТИВОТЕПЛОВОЙ ОДЕЖДЫ

В статье представлен теоретический расчет теплового потока от внешних источников тепла через всю толщину стенки противотеплового жилета на охлаждающие элементы, предложена усовершенствованная конструкция противотепловой одежды горнорабочих и спасателей, позволяющая повысить ее охлаждающий ресурс, описаны результаты экспериментов по исследованию теплоизоляционных свойств действующей и модернизированной конструкций противотеплового жилета методом тепловизионной диагностики, а также даны рекомендации по дальнейшему усовершенствованию индивидуальных средств противотепловой защиты.

Ключевые слова: средства индивидуальной противотепловой защиты, тепловой поток, лучеотражающий слой, теплоизоляционные свойства, тепловизионная техника

V.K. Kostenko, V.V. Kolesnikova, A.I. Morozov

RESEARCHES OF ANTITHERMAL WAISTCOAT THERMAL PHYSICAL PROPERTIES

In the article the theoretical calculation of thermal stream is presented from the outsourcings of heat through all of thickness of wall of antithermal waistcoat on coolings elements, the improved construction of antithermal clothes of miners and rescuers is offered, allowing to promote its cooling resource, the results of experiments are described on research of thermal isolation properties of operating and modernized constructions of antithermal waistcoat by the method of thermal vision diagnostics, and also to recommendation on the further improvement of individual facilities of antithermal defence.

Key words: facilities of individual antithermal defence, thermal stream, rayreflecting layer, thermal isolation properties, thermal vision technique

